論 文

# 加熱炉からのふく射を考慮した耐火断熱れんがの 熱伝導率と熱膨張率の推定

正 員	矢納	陽*a)	非会員	内田	茂樹**	非会員	細谷	直紀***
非会員	和田	克啓****	非会員	見浪	護*5	非会員	松野	隆幸*5
			非会員	増井詞	永一郎*5			

## Estimation of Thermal Conductivity and Thermal Expansion Coefficient for Insulating Firebrick with Radiation from Heating Furnace

Akira Yanou<sup>\*a)</sup>, Member, Shigeki Uchida<sup>\*\*</sup>, Non-member, Naoki Hosoya<sup>\*\*\*</sup>, Non-member, Katsuhiro Wada<sup>\*\*\*\*</sup>, Non-member, Mamoru Minami<sup>\*5</sup>, Non-member, Takayuki Matsuno<sup>\*5</sup>, Non-member, Yoichiro Masui<sup>\*5</sup>, Non-member

(2016年5月25日受付, 2016年9月30日再受付)

This paper reports an estimation result of thermal conductivity and thermal expansion coefficient for insulating firebrick model with radiation from heating furnace. The insulating firebrick is used for blast furnace in steel industry and exposed to high temperature environment. In this situation, it is difficult to specify physical characteristics such as thermal conductivity and thermal expansion coefficient because the measurement methods regulate allowable measurement ranges for temperature. Moreover the physical characteristics change as time passes. That is, the estimation of physical characteristics is essential to model the dynamics and keep the control performance considering active safety. It also indicates that the characteristic of the model obtained by the estimation becomes the basis of green innovation. Therefore, this paper models an insulating firebrick with radiation from heating furnace and tries to estimate thermal conductivity and thermal expansion coefficient through extended Kalman filter and experimental data. From the result, it found that the physical characteristics could be estimated by the input and the output data about insulating firebrick.

キーワード:耐火断熱れんが、熱伝導率、熱膨張率、推定

Keywords: insulating firebrick, thermal conductivity, thermal expansion coefficient, estimation

a) Corresp	ondence	to: Akir	a Yanou.	E-mail:	yanou-a@mw.
kawasa	ki-m.ac.jp	)			
* 川崎医	療短期大	学放射線	技術科		
〒 701-	0194 岡口	山県倉敷ī	市松島 316	5	
Departi	nent of R	adiologi	al Techno	ology, Ka	wasaki College
of Allie	d Health	Professio	ns		
316, M	atsushima	ı, Kurash	ki, Okaya	ma 701-0	194, Japan
** 品川リ	フラクト	リーズ(	株)技術	研究所	
〒 705-	8577 岡日	山県備前す	<b>卜伊部 70</b> 2	7	
Researc	h Center,	Shinaga	wa Refrac	tories Co.	., Ltd.
707, Im	be, Bizen	ı, Okayar	na 705-85	77, Japan	
*** オージ	ー技研(	株)製造	部		
〒 701-	4233 岡山	山県瀬戸区	内市邑久町	丁向山 77	

- 〒 701-4233 岡田県瀬戸内市邑久町回田 77 Production Division, OG Wellness Technologies Co., Ltd. 77, Mukoyama, Oku-cho, Setouchi, Okayama 701-4233, Japan
- \*\*\*\* 東京工業大学工学院機械系 〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

## **1.** はじめに

温度制御は重化学工業において製品品質を決定する重要 な要素の一つであり、ある媒体が熱を伝える際の物理量と して熱伝導率が定義されている。この値が大きいほど熱が 伝わりやすいことを表しており、測定対象物の熱伝導率は オフラインで取得することができる<sup>(1)</sup>。また、熱伝導率だ

Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tokyo Insutitute of Technology
4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503, Japan
\*<sup>5</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科

〒 700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1
Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University
3-1-1, Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama, Okayama 700-8530, Japan

けでなく熱膨張率などの物理パラメータは温度とともに変 化するため<sup>(2)</sup>,温度制御においては目標値の変更や外乱の 影響によって制御対象を構成する各部位のパラメータも変 化し,結果として制御対象の特性が変化する。この場合,オ フラインで取得したデータを利用して制御対象のモデルを 再構築すれば,制御性能を維持することも期待できる。

しかし、オフラインで取得できる測温データに対して前 述のパラメータの値を定められる温度範囲が規定されてい るため、この範囲外では制御対象のモデルが構築できない。 さらに、制御対象の経年変化によって実際のパラメータ値 が過去に取得したデータとは異なってしまい. 結果として 制御性能の劣化を招く可能性がある。したがって、制御性能 を維持するためには制御対象のモデルに基づき各パラメー タの値を推定できることが望ましい。具体的には、前述の 温度範囲外でも制御対象のパラメータが推定できれば、性 能の維持だけでなく、これまで知ることのできなかった制 御対象のパラメータの動きも分かるようになると考えられ る。このことは、予防安全を考慮した制御を可能にするとい う意味においてグリーンイノベーションの推進に必要不可 欠な要素である。これまで著者らはアルミニウム板温度制 御実験装置や耐火断熱れんがのモデルに対して熱伝導率や 熱膨張率を推定した結果について報告しているが(3)~(5), 耐 火断熱れんがのモデルは、入力として試料片周囲の空気か らの熱伝達しか考慮しておらず、試料片を覆う加熱炉から のふく射伝熱は考慮していなかった。同様の研究として高 橋(00) は耐火断熱レンガの分散系のモデルを定義し,数値 シミュレーションによって得られたモデルの温度分布から 熱伝導率を求める試みを行っている。中村ら®は拡張カル マンフィルタを用いたコンクリート構造物の熱特性値の推 定を行っており,拡張カルマンフィルタと有限要素法を組 み合わせている。また、稲葉ら®はある温度における酸化 物ガラスの熱伝導率の値からその推定式を導出している。 Vergnaud ら<sup>(10)</sup> は熱伝導率を共役勾配法に基づいてオンラ イン同定する数値シミュレーションを行っている。一方,集 中定数系の簡易なモデルと測定温度の時系列データを拡張 カルマンフィルタに適用し、熱伝導率や熱膨張率を同時に 推定する試みは行われていない。有用性の点から、実測し た時系列データをもとに制御対象のパラメータが簡易なモ デルで推定できることは重要な意義があると考えられる。

そこで本報告では、加熱炉からのふく射伝熱も考慮した 耐火断熱れんがの試料片の動的モデルを提案し、試料片の 周囲を測温した実験データを拡張カルマンフィルタ<sup>(11)</sup> に適 用することで試料片温度とその熱伝導率および熱膨張率の 推定を試みた結果について述べる。

## 2. 加熱炉からのふく射伝熱を考慮した耐火断熱れ んがのモデル化

耐火断熱れんがの試料片の概要を Fig.1 に示す。試料片 は加熱炉に入れられ,発熱体によって試料片周囲が加熱され る。その際,試料片の上面からおよそ10[mm]の位置で測温



Fig. 1. Insulating firebrick envrironment



Fig. 2. Insulating firebrick model

Table 1. Insulating firebrick model parameters

Length $l_1$ : 70 [mm]
Width $l_2$ : 20 [mm]
Thickness $l_3$ : 15 [mm]
Density of $x_1$ and $x_2$ : 3909 [kg/m <sup>3</sup> ]
Specific heat of $x_1$ and $x_2$ ( $c_1$ , $c_2$ ): 1100 [J/kgK]
Heat transfer coefficient $\alpha$ : 25 [W/m <sup>2</sup> K]
Length $l_4$ : 17 [mm]
Width <i>l</i> <sub>5</sub> : 8 [mm]
Thickness $l_6$ : 5 [mm]
Density of $x_3$ : 0.265 [kg/m <sup>3</sup> ]
Specific heat of $x_3$ ( $c_3$ ): 1193 [J/kgK]
Thermal conductivity of $x_3 (\lambda_0)$ : 0.0802 [W/mK]

される。構築するモデルではこの温度を T<sub>0</sub>[K] とおき, 試 料片に与える入力信号とする。また, 試料片は横 17 [mm], 縦 8 [mm], 深さ 5 [mm] の貫通した穴を持つ試料台に乗せ られた状態で加熱され, この穴部分の小領域(試料片の下 面からおよそ 5 [mm])でも測温される。本モデルではこの 小領域の温度を T<sub>3</sub>[K] とおき, 試料片から得られる出力信 号であるとする。

本研究ではこの試料片に対して Fig.2 に示すモデルを考 える。試料片を二つの部位  $x_1$ ,  $x_2$  に分けて考え, さらに試 料台に開けられた穴部分の小領域を  $x_3$  としてモデルの一 部であると定義した。なお, 試料片のモデルを二つの部位 に粗く分割した理由は, 前述の通り簡易なモデルによって 制御対象のパラメータを推定できれば, 実装の容易さにお いて有用であると考えられるからである。ここで試料片お よび小領域の各辺の長さを  $l_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) とおく。また, 試料片のモデルのパラメータを Table 1 に示す。以下では 試料片および小領域が試料台と接触している部分(部位  $x_2$ の底面および  $x_3$  の側面) は熱が移動しないと仮定してモデ ルの構築を行う。 まず, Fig.2 に示す部位 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub> の温度に関する状態 量 x<sub>i</sub> [K] を *i* = 1,2,3 に対してつぎのように定義する。

 $x_i = T_i - T'_i$ 

 $T_i$ [**K**] は各部位の温度,  $T'_i$ [**K**] はそれぞれの初期温度を表 す。つぎに伝熱に関する以下の法則を用いてモデル化を行 う<sup>(12)</sup>。

熱伝導に関するフーリエの法則:

 $q = -\lambda_f (d\theta/dn)$ 

ここでq [W/m<sup>2</sup>],  $\lambda_f$  [W/mK],  $d\theta/dn$  [K/m] はそれぞれ熱流 束, 熱伝導率, 熱流の温度傾斜を表す。

熱伝達とニュートンの冷却法則:

 $q = \alpha(\theta_s - \theta_f)$ 

 $\alpha$  [W/m<sup>2</sup>K] は熱伝達率,  $\theta_s$  [K] は固体の表面温度,  $\theta_f$  [K] は固体と接触している媒体の温度を表す。

ふく射伝熱に関する式:

 $E = \varepsilon \sigma \theta^4$ 

 $E[W/m^2]$ は全放射能,  $\varepsilon$ は全放射率,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}[W/(m^2K^4)]$ はステファン-ボルツマン定数,  $\theta[K]$ は温度である。

さらに以下の法則が成り立つ。

 $dQ = mcd\theta$ 

dQ[J]は熱量, c[J/kgK]は比熱, m[kg]は質量,  $d\theta[K]$ は 温度変化を表す。以上をもとに, モデルに与えられる入力 が $T_0$ であると考えると, Fig.2の各部位 $x_i$ の温度変化に 関する式はつぎのように与えられる。なお, ここでは時間 関数を表す添え字(t)は省略して記述する。

このモデルは入力が $u(t) = T_0(t)$ , 出力が $y(t) = x_3(t) + T'_3$ で ある。 $m_i$  [kg] は各部位 x<sub>i</sub>の質量,  $c_i$  [J/kgK] は比熱,  $S_1$  [m<sup>2</sup>] は $x_1$ の外気(入力温度 $T_0(t)$ )との接触表面積, $S_2[m^2]$ は  $x_1 \ge x_2$ の接触面積,  $S_3[m^2]$ は $x_2$ の外気との接触表面積,  $S_4[m^2]$ は $x_2$ と $x_3$ ,および $x_3$ と外気との接触面積である。 ここで、モデルの各面に対する熱膨張率β、初期温度にお ける接触表面積  $S'_1$ ,  $S'_2$ ,  $S'_3$  に対して  $S_1 = S'_1(1 + \beta x_1)$ ,  $S_2 = S'_2(1 + \beta \frac{x_1 + x_2}{2}), S_3 = S'_3(1 + \beta x_2)$ が成り立つものとす る。また、 $d_1 = d_2 = \frac{h_2}{2}$ としている。なお、このモデルでは x3 と外気間での熱の移動は擬似的に熱伝達によって起こる と仮定し、その熱伝達率を $\lambda_0/d_0$  [W/m<sup>2</sup>K] と定義した。本 報告では d<sub>0</sub> = 0.005 [m] とする。加熱炉からのふく射は炉 の温度 T<sub>0</sub> に対し, 試料片の部位 x<sub>1</sub> と x<sub>2</sub> それぞれの外気と の接触表面積の割合に応じてふく射熱を受けるものとして いる。 κ [m<sup>2</sup>] は加熱炉の全放射率とその表面積に関する比 例定数である。また簡単のため部位 x1 と x2 それぞれの外 気との接触表面積の割合は一定であるとする。

#### 3. 熱伝導率と熱膨張率の推定

拡張カルマンフィルタによる熱伝導率と熱膨張率の推定 を試みるため、式 (1)、(2)、(3)を実験データを取得した際 のサンプリング時間  $\Delta t$  を用いて次のように離散化する。な お以下では時刻  $t = k\Delta t$  ( $k = 0, 1, 2\cdots$ )における状態量  $x_i(t)$ を  $x_i(k)$  で表すものとする。

さらに熱伝導率 $\lambda_f(k)$ と熱膨張率 $\beta(k)$ を含む新しい状態量z(k)を定義する。

	$z_1(k)$		$\begin{bmatrix} x_1(k) \end{bmatrix}$
	$z_2(k)$		$x_2(k)$
z(k) =	$z_3(k)$	=	$x_3(k)$
	$z_4(k)$		$\lambda_f(k)$
	$z_5(k)$		$\beta(k)$

これに基づき次式の拡大系を得ることができる。

$$f(z(k), u(k)) = \begin{bmatrix} f_1(z(k), u(k)) \\ f_2(z(k), u(k)) \\ f_3(z(k), u(k)) \\ f_4(z(k), u(k)) \\ f_5(z(k), u(k)) \\ h(z(k), u(k)) = z_3(k) + T'_3 \end{bmatrix}$$

である。さらに  $f_i(\mathbf{z}(k), \mathbf{u}(k))$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) は  $\gamma_i = \frac{\Delta t}{m_i c_i}$  とおくと以下で与えられる。

$$f_1(z(k), u(k)) = \left\{ 1 - \gamma_1 \left( \alpha S'_1 + \frac{S'_2 z_4(k)}{d_1} \right) \right\}$$

$$\begin{split} &-\gamma_{1}T_{1}'\left(\alpha S_{1}'+\frac{S_{2}'z_{4}(k)}{2d_{1}}\right)z_{5}(k) \\ &+\frac{\gamma_{1}T_{2}'S_{2}'z_{4}(k)z_{5}(k)}{2d_{1}}\right)z_{1}(k) \\ &-\gamma_{1}\left\{\varepsilon\sigma S_{1}'(z_{1}(k)+T_{1}')^{4}(1+z_{1}(k)z_{5}(k)) \\ &+\left(\alpha S_{1}'+\frac{S_{2}'z_{4}(k)}{2d_{1}}\right)z_{1}^{2}(k)z_{5}(k)\right\} \\ &+\frac{\gamma_{1}S_{2}'}{2d_{1}}\left\{2-(T_{1}'-T_{2}')z_{5}(k)\right\}z_{2}(k)z_{4}(k) \\ &+\frac{\gamma_{1}S_{2}'z_{2}^{2}(k)z_{4}(k)z_{5}(k)}{2d_{1}}-\gamma_{1}\left\{T_{1}'\left(\alpha S_{1}'+\frac{S_{2}'z_{4}(k)}{d_{1}}\right) \\ &-\frac{T_{2}'S_{2}'z_{4}(k)}{2d_{1}}\right\}+\gamma_{1}\alpha S_{1}'(1+z_{1}(k)z_{5}(k))u(k) \\ &+\frac{S_{1}'}{S_{1}'+S_{3}'}\gamma_{1}\kappa\sigma u^{4}(k)\cdots(7) \\ f_{2}(z(k),u(k))&=\frac{\gamma_{2}S_{2}'}{2d_{2}}\left\{2+(T_{1}'-T_{2}')z_{5}(k)\right\}z_{1}(k)z_{4}(k) \\ &+\frac{\gamma_{2}S_{2}'}{2d_{2}}z_{1}^{2}(k)z_{4}(k)z_{5}(k) \\ &+\left\{1-\gamma_{2}\left(\alpha S_{3}'+\alpha S_{4}+\frac{S_{2}'z_{4}(k)}{d_{2}}\right) \\ &+\frac{\gamma_{2}T_{1}'S_{2}'z_{4}(k)z_{5}(k)}{2d_{2}}-\gamma_{2}T_{2}'\left(\alpha S_{3}'\right) \\ &+\frac{S_{1}'+S_{3}'+S_{2}'z_{4}(k)z_{5}(k)}{2d_{2}}\right)z_{2}^{2}(k)z_{5}(k)\right\} \\ &+\gamma_{2}\alpha S_{4}z_{3}(k)+\gamma_{2}\left\{\frac{T_{1}'S_{2}'z_{4}(k)}{d_{2}} \\ &-\left(\alpha S_{3}'+\alpha S_{4}+\frac{S_{2}'z_{4}(k)}{d_{2}}\right)T_{2}'\right) \\ &+\alpha S_{4}T_{3}'\right\}+\gamma_{2}\alpha S_{3}'(1+z_{2}(k)z_{5}(k))u(k) \\ &+\frac{S_{3}'}{S_{1}'+S_{3}'}\gamma_{2}\kappa\sigma u^{4}(k)\cdots(8) \\ f_{5}(z(k),u(k))&=\gamma_{3}\alpha S_{4}z_{2}(k)+\left\{1-\gamma_{3}\left(\alpha S_{4}+\frac{\lambda_{0}S_{4}}{d_{0}}\right)\right\}z_{3}(k) \\ &+\gamma_{3}\left\{\alpha S_{4}T_{2}'-\left(\alpha S_{4}+\frac{\lambda_{0}S_{4}}{d_{0}}\right)T_{3}'\right\}+\frac{\gamma_{3}\lambda_{0}S_{4}}{d_{0}}u(k) \\ &\cdots(9) \\ f_{4}(z(k),u(k))&=z_{4}(k)\cdots(10) \\ f_{5}(z(k),u(k))&=z_{4}(k)\cdots(10) \\ f_{5}(z(k),u(k))&=z_{5}(k)\cdots(11) \end{cases}$$

$\boldsymbol{P}(0) = \boldsymbol{\Sigma}_0 \cdots \cdots$	3
--	---

またシステム雑音の分散が $\sigma_v^2$ , 観測雑音の分散が $\sigma_w^2$ であるとする。さらに $k = 1, 2, \cdots, N$ に対して次のように事前状態推定値を計算する。

つぎに式(5),(6)を利用して以下のヤコビアンを計算する。

$$A(k-1) = \frac{\partial f(z(k), u(k))}{\partial z(k)} \Big|_{z(k)=\hat{z}(k-1), u(k)=u(k-1)} \cdots (15)$$
$$c^{T}(k) = \frac{\partial h(z(k), u(k))}{\partial z(k)} \Big|_{z(k)=\hat{z}^{-}(k), u(k)=u(k)} \cdots \cdots (16)$$

本報告では式(15)を利用して以下の事前誤差共分散行列 **P**<sup>-</sup>(k)を計算する。

$$P^{-}(k) = A(k-1)P(k-1)A^{T}(k-1) + \sigma_{v}^{2}dd^{T}\cdots(17)$$

ここで *d<sup>T</sup>* = [1 1 1 0 0] とした。式 (16), (17) に基づき カルマンゲイン *g*(*k*) を計算する。

これらの計算から状態推定値 **ĉ**(*k*),事後誤差共分散行列 **P**(*k*) を求めることができる。

$$\hat{z}(k) = \hat{z}^{-}(k) + g(k) \{y(k) - h(\hat{z}^{-}(k), u(k))\} \dots \dots \dots (19)$$
$$P(k) = \{I - g(k)c^{T}(k)\} P^{-}(k) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (20)$$

上述の手順を繰り返し行うことによって,モデルの温度と 熱伝導率,および熱膨張率の推定値を得ることを試みる。

## 4. 推定結果

以下では取得した実験データに合わせ,温度の単位を [K] ではなく [°C] で表すものとする。まず,実験データ のサンプル数(試料片上部(部位 x<sub>1</sub> から 10[mm] 上)の 測温結果を入力信号, 試料片下部(部位 x<sub>3</sub>)の測温結果 を出力信号としたデータの組数)は36370である。デー タ処理の関係上,入力温度が1500.2 [°C] に上昇するまで (15735 番目のサンプルデータまで) はサンプリング時間 が  $\Delta t = 1.5$ , それ以降は  $\Delta t = 2$  となっている。したがっ て,推定に用いたモデルの式(5),(6)は推定の途中で切 り替えられている。本報告ではモデルのふく射に関する項 の全放射率を $\varepsilon = 0.9$ ,システム雑音の平均を0,分散を 0.01<sup>2</sup>, 観測雑音の平均を 0, 分散を 0.001<sup>2</sup> とおいた。さ らに初期値は実験データに基づき試料片上部ならびにモデ ルの部位  $x_1$  の初期温度を  $T_0 = T_1 = 31.7$  [°C], モデル の部位  $x_2$  および  $x_3$  の初期温度を  $T_2 = T_3 = 24.2$  [°C] と おいた。拡張カルマンフィルタの誤差共分散行列の初期値 は P(0) = diag{1,1,0.01,0.01,0.01}, 推定する熱伝導率と 熱膨張率の初期値はそれぞれ  $\lambda_f(0) = z_4(0) = 0$  [W/mK],  $\beta(0) = z_5(0) = 0$ とおいた。また、加熱炉からのふく射に関 する比例定数は κ = 0.0043 とおいた。

以上の条件のもと、モデルの部位 x1, x2, x3 の各温度,



Fig. 3. Estimated temperature of  $x_1$  (solid line), Measured input temperature (chain line) and Measured output temperature (dashed line)



Fig. 4. Estimated temperature of  $x_2$  (solid line), Measured input temperature (chain line) and Measured output temperature (dashed line)

熱伝導率 $\lambda_f$ および熱膨張率 $\beta$ を推定した結果をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 および Fig. 7 に示す。Fig. 3, Fig.4, Fig.5 では実線が推定値,一点鎖線が試料片上部の 測温データ (入力信号),破線が試料片下部の測温データ (出 力信号)を表している。Fig.3に示すように、およそ5000 ステップ目以降から部位 x1 の温度の推定値が出力信号に 近い値で推移している。また, Fig.4 については, およそ 25000 ステップ目まで部位 x2 の温度の推定値が出力信号に 近い値で推移した。一方, Fig.5から, 部位 x3の温度の推 定結果が出力信号(部位 x3 の測温結果)と一致しているた め,出力信号の推定が行えていることを確認できる。また, 本報告で提案しているモデルでは x3 は x2, x2 は x1 と接 触していることから, x1 と x2 の温度は x3 の温度と相関が あると考えられる。全放射率、加熱炉からのふく射に関す る比例定数、拡張カルマンフィルタの各初期値といったパ ラメータを、測温データとその推定値が近くなるように試 行錯誤して決定したため、推定結果の妥当性と信頼性につ いて検討の余地があるものの、およそ 5000 から 25000 ス



Fig. 5. Estimated temperature of  $x_3$  (solid line), Measured input temperature (chain line) and Measured output temperature (dashed line)



Fig. 7. Estimated thermal expansion coefficient

テップの間において,各部位 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub> の温度の推定結果はそ れらの温度変化の傾向を表していると考えられる。さらに Fig. 6, Fig. 7 はそれぞれ実験データに基づいて推定した耐 火断熱れんがの試料片モデルの熱伝導率と熱膨張率を示し ている。各部位の温度変化とともに熱伝導率および熱膨張 率の値も変化していく様子を確認できる。

## 5. おわりに

本報告では耐火断熱れんがの離散時間モデルの拡大系を 構築した。さらに、実験データを拡張カルマンフィルタに 適用することで、構築したモデルの各部位の温度、熱伝導 率および熱膨張率の推定結果を示した。具体的には、取得 した実験データと加熱炉からのふく射伝熱を考慮したモデ ルを用いて,耐火断熱れんがの試料片の温度,熱伝導率,熱 膨張率の推定値をオフラインで得ることを試みた。なお本 報告では、全放射率、加熱炉からのふく射に関する比例定 数.および拡張カルマンフィルタの各初期値といったパラ メータを, 測温データとそれらの推定値が近くなるように 試行錯誤して決定した。各部位の温度,熱伝導率と熱膨張 率の推定結果はこれらのパラメータの値に基づき得られた ものである。したがって、これらの推定結果の妥当性と信 頼性について今後検討するとともに、各パラメータを適切 な値に設定する方法も検討する必要がある。また、実験中 のデータを直接用いたオンライン推定や耐火断熱れんがの 構造物の状態監視に関する研究を実施し、将来的には予防 安全に関する技術へ展開していきたい。

> 文 献

- (1) Japanese Industrial Standards Committee: JIS R2616 (Testing method for thermal conductivity of insulating fire bricks) (2011) (In Japanese) 日本工業標準調査会: JIS R2616 (耐火断熱れんがの熱伝導率の試験 方法) (2011)
- (2) KYOCERA Corporation Corporate Fine Ceramics Group: "Characteristics of Kyocera Technical Ceramics", KYOCERA Corporation (2014) (In Japanese) 京セラ(株)ファインセラミック事業本部:「材料特性表」,京セラ

(株) (2014)

(3) A. Yanou, S. Uchida, N. Hosoya, M. Mamoru, and T. Matsuno: "Estimation of Thermal Conductivity for Temperature Control Model of an Aluminum Plate", Proceedings of the 57th Japan Joint Automatic Control Conference, pp.333-337 (2014) (In Japanese) 矢納 陽・内田茂樹・細谷直紀・見浪 護・松野隆幸:「アルミ板温 度制御モデルに対する熱伝導率の推定」,第57回自動制御連合講演

会論文集, pp.333-337 (2014) (4) A. Yanou, S. Uchida, N. Hosoya, M. Minami, and T. Matsuno: "Estimation of Thermal Conductivity for Insulating Firebrick", Proceedings of the 58th Japan Joint Automatic Control Conference, 2B4-4 (2015) (In Japanese) 矢納 陽・内田茂樹・細谷直紀・見浪 護・松野隆幸:「耐火断熱れ

- んがの熱伝導率の推定」,第58回自動制御連合講演会論文集,2B4-4 (2015)(5) A. Yanou, S. Uchida, N. Hosoya, M. Minami, T. Matsuno, and Y. Masui:
- "Estimation of Thermal Conductivity and Thermal Expansion Coefficient for Insulating Firebrick", Proceedings of the 3rd Multi-symposium on Control Systems (MSCS 2016), 3D1-4 (2016) (In Japanese) 矢納 陽・内田茂樹・細谷直紀・見浪 護・松野隆幸・増井詠一郎: 「耐火断熱れんがの熱伝導率と熱膨張率の推定」,第3回計測自動制 御学会制御部門マルチシンポジウム資料, 3D1-4 (2016)
- (6) K. Takahashi: "Consideration on Heat Transfer Mechanism and Thermal Conductivity of Thermal Insulation Brick", Memoirs of the Faculty of Education and Human Studies, Akita University, Natural Science, Vol.59, pp.11-15 (2004) (In Japanese) 高橋カネ子:「耐火断熱レンガの伝熱機構と熱伝導率に関する考察」,
- 秋田大学教育文化学部研究紀要,自然科学, Vol.59, pp.11-15 (2004) (7) K. Takahashi: "Consideration on Heat Transfer Mechanism and Thermal Conductivity of Thermal Insulation Brick (2nd)", Memoirs of the Faculty of Education and Human Studies, Akita University, Natural Science, Vol.61, pp.45-49 (2006) (In Japanese)

高橋カネ子:「耐火断熱レンガの伝熱機構と熱伝導率に関する考察(第

2報)」,秋田大学教育文化学部研究紀要,自然科学, Vol.61, pp.45-49 (2006)

(8) H. Nakamura, S. Hamada, S. Tanaka, and S. Akimoto: "Estimation of Thermal Properties of Concrete Using Extended Kalman Filter Algorithm", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.14, No.1, pp.1125-1130 (1992) (In Japanese) 中村秀明・浜田純夫・田中周次・秋本悟志:「拡張カルマンフィルタ によるコンクリート構造物の熱特性値の推定」、コンクリート工学

年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1125-1130 (1992)  $(\,9\,)$   $\,$  S. Inaba, S. Oda, and K. Morinaga: "Equation for Estimating the Thermal Diffusivity, Specific Heat and Thermal Conductivity of Oxide Glasses", Journal of the Japan Institute of Metals and Materials, Vol.65, No.8, pp.680-687 (2001) (In Japanese)

稲葉誠二・小田周平・森永健次:「酸化物ガラスの熱拡散率、比熱お よび熱伝導率の推定式」, 日本金属学会誌, Vol.65, No.8, pp.680-687 (2001)

- (10) A. Vergnaud, G. Beaugrand, O. Gaye, L. Perez, P. Lucidarme, and L. Autrique: "On-line identification of temperature-dependent thermal conductivity", Proceedings of the 2014 European Control Conference (ECC), pp.2139-2144 (2014)
- (11)S. Adachi and I. Maruta: Fundamentals of Kalman Filter, Tokyo Denki University Press (2012) (In Japanese)
- 足立修一・丸田一郎:カルマンフィルタの基礎、東京電機大学出版 局 (2012)
- (12) T. Koyama: Heat Transfer, Morikita Publishing Co., Ltd. (2012) (In Japanese)
- 小山敏行:例題で学ぶ伝熱工学,森北出版(株)(2012)
- (13) K. Wada, N. Hosoya, A. Yanou, S. Uchida, M. Minami, and T. Matsuno: "Modeling of Insulating Firebrick for On-line Estimation of Thermal Conductivity", Proceedings of the 24th SICE Chugoku Branch Conference, pp.120-121 (2015) (In Japanese) 和田克啓・細谷直紀・矢納 陽・内田茂樹・見浪 護・松野隆幸: 「熱伝導率のオンライン推定を目指した耐火断熱れんがのモデル化」、 第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp.120-121 (2015)



(正員) 1996 年岡山大学工学部情報工学科卒業。 1998年同大学大学院工学研究科修士課程修了。 2001年同大学大学院自然科学研究科博士課程修 了。同大学大学院研究生を経て、2002年近畿大学 工学部助手。2004年同講師を経て、2009年岡山 大学大学院自然科学研究科助教。2016年川崎医 療短期大学放射線技術科准教授。現在に至る。予 測制御に関する研究に従事。博士(工学)。計測

自動制御学会、システム制御情報学会、日本機械学会等の会員。



内 田 茂 樹 (非会員) 1983 年名古屋大学大学院工学研究科修 了。同年,品川白煉瓦(株)入社,技術研究所にて 耐火物の製造プロセス研究,特性研究,構造解析 研究に従事。現在,品川リフラクトリーズ(株)技 術研究所試験センター長。工学博士(大阪大学)。



細 谷 直 紀 (非会員) 2014 年 3 月岡山大学工学部機械シス テム系学科卒業。2016年3月岡山大学大学院自然 科学研究科博士前期課程修了。同年 4 月オージー 技研(株)入社。現在に至る。





和田克啓(非会員) 2016年3月岡山大学工学部機械シス テム系学科卒業。同年4月東京工業大学工学院機 械系進学。現在に至る。



松野隆幸(非会員) 2004年9月名古屋大学大学院工学研 究科マイクロシステム工学専攻博士課程後期課程 満期退学, 2004年10月名古屋大学大学院工学研 究科助手。2005年3月に学位を取得,博士(工 学)。以降 2006 年 4 月より富山県立大学工学部助 手,助教,講師。2011年10月より岡山大学大学 院自然科学研究科講師に着任。ロボットによる柔 軟物体のマニピュレーション, 組立作業の自動化

に関する研究に従事。



護(非会員) 1979 年大阪府立大学工学部航空工学 科卒業, 1981年同大学工学研究科航空工学専攻 修士課程修了。1993年金沢大学大学院自然科学 研究科博士課程修了。博士(工学)。1994年福井 大学工学部機械工学科助教授, 2002年同学部知 能システム工学科教授, 2010年岡山大学大学院 自然科学研究科教授,現在に至る。ロボットの力 学, 拘束運動, 力制御, 移動マニピュレータの制

御,画像認識,ビジュアルサーボイング等の研究に従事。日本機械学 会,計測自動制御学会, IEEE などの会員。



**增** 井 詠一郎 (非会員) 2014 年 3 月奈良先端科学技術大学院 大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在, 岡 山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻博 士後期課程に在学中。システム制御情報学会,計 測自動制御学会, IEEE の学生会員。